

Title	人間生活圏を取り巻く大気の微量物質の動態把握
Author(s)	高橋, けんし; 矢吹, 正教; 中山, 智喜; 青木, 一真; 林, 泰一; 津田, 敏隆
Citation	生存圏研究 (2013), 8: 39-48
Issue Date	2013-02-10
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2433/184862">http://hdl.handle.net/2433/184862</a>
Right	
Type	Departmental Bulletin Paper
Textversion	publisher

## 人間生活圏を取り巻く大気の微量物質の動態把握\*

高橋 けんし<sup>1\*\*</sup>、矢吹 正教<sup>1\*\*\*</sup>、中山 智喜<sup>2</sup>、  
青木 一真<sup>3</sup>、林 泰一<sup>4</sup>、津田 敏隆<sup>1</sup>

### Towards understanding the short-term air quality changes associated with the dynamics of surface layer

Kenshi Takahashi<sup>1\*\*</sup>, Masanori Yabuki<sup>1\*\*\*</sup>, Tomoki Nakayama<sup>2</sup>,  
Kazuma Aoki<sup>3</sup>, Taiichi Hayashi<sup>4</sup>, and Toshitaka Tsuda<sup>1</sup>

#### 概要

大気質の悪化は、健康や植生に対する影響、気候変動への関与など、多岐に亘って影響を及ぼすことが懸念されている。安全で安心な大気環境を確立・維持するためにも、現在の大気質変動の動態を詳細に把握し、将来的な変動を正しく予測する必要がある。しかしながら、その対策の際に必須の知見となる大気質特性の変動要因には、未解明な部分も多く残されている。本プロジェクトでは、人間生活圏および森林圏に近い大気の化学的動態の変動に着目し、大気微量成分(ガスおよび粒子状物質)の時空間分布を精細に描写する新しい大気計測手法を提案する。2010 年秋および 2011 年春の予備調査ならびに予備観測を踏まえて、2011 年 9 月には滋賀県甲賀市にある信楽 MU 観測所(34.9° N, 136.1° E)において、接地境界層におけるエアロゾル・微量気体プロファイル観測実験(AEROGAP - Phase I)を実施した。この観測では、新しい試みとして、係留気球をプラットフォームとして活用することにより、微量ガス状物質の鉛直立体分布を測定する方法を考案した。エアロゾル粒子のポータブル測定器を係留気球に直接搭載し、地上 100 m 高におけるエアロゾル粒子の動態把握にも挑戦した。また、地上設置の直接およびリモートセンシング計測データと、係留気球を上空に飛翔させて観測したデータとを突き合わせ、エアロゾルの物理・化学・光学特性の立体分布特性を考察した。この観測から、オゾン濃度の高度勾配の時間変化や、鉛直方向の風速と関連すると思われる極微細なエアロゾル粒子の濃度の変化など、今まで直接的な観測が困難であった現象を捉えることができた。今後は、市街地や森林域など様々な環境下においても運用可能な、微量成分の動態把握につながる手法の開拓を進めていく予定である。

---

\* 2012 年 11 月 15 日受理

<sup>1</sup>〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所

<sup>2</sup>〒464-8601 名古屋市千種区不老町 名古屋大学太陽地球環境研究所

<sup>3</sup>〒930-8555 富山県富山市五福 3190 富山大学大学院理工学研究部

<sup>4</sup>〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学防災研究所

\*\* E-mail: tkenshi@rish.kyoto-u.ac.jp

\*\*\* E-mail: yabuki@rish.kyoto-u.ac.jp

## 1. 研究の背景と目的

本プロジェクトは、地球環境問題の中でも大気圏で生起している問題、とりわけ人間生活圏および森林圏に近い大気の化学的動態の変動の解明に焦点を当てている。我々人間の営む活動によって、大気中に様々な物質が放出される。これらは概して量は微量であるが、種類は多岐に及び、人間の健康や植生への被害、気候変動の要因となる放射収支への作用<sup>1)</sup>(図1)など、多方面に亘って複雑な影響を及ぼす。地表付近の大気質(air quality)の悪化は、スモッグとよばれる視程の低下をもたらす

現象を引き起こすこともある(図2)。視程障害は、人為起源の気体やエアロゾルにより太陽放射が吸収・散乱されることが原因である。エアロゾルとは、空気中に微小な液体粒子や個体粒子が浮遊している分散系、あるいはそれらの微小な粒子そのものを意味する。エアロゾル粒子の発生源は、工場や自動車など人間活動に伴い排出される人為起源と、樹木や土壌、海水など自然界から放出される自然起源とに大別される。大気中に放出されたガス成分とエアロゾル粒子は、大気の運動によって輸送・拡散され、またその間に物理・化学的に変質するとともに、降雨や重力沈降に伴う沈着過程により大気中から除去される<sup>2)</sup>。

様々な汚染物質から人々を保護する目的で、多くの先進国において大気質の環境基準(それを超えてはいけぬ濃度レベル)が法令で定められている。例えば光化学オキシダント( $\text{O}_3$ )に関して、わが国では、環境基本法により「一時間値が0.06ppm以下であること」を定めている。同様に窒素酸化物や硫黄酸化物、微小粒子状物質(粒径 $2.5\mu\text{m}$ 以下の粒子)、浮遊粒子状物質(同 $10\mu\text{m}$ 以下)に関しても、それぞれ環境基準が定められている。高度成長期時代に最悪とされていた我が国の大気質は徐々に改善されているとされてきたが、2000年代に入ってから、スモッグの発生件数が増加に転じたことが問題となっている。この原因として、中国などの新興国からの前駆物質の放出・輸送、日本で排出

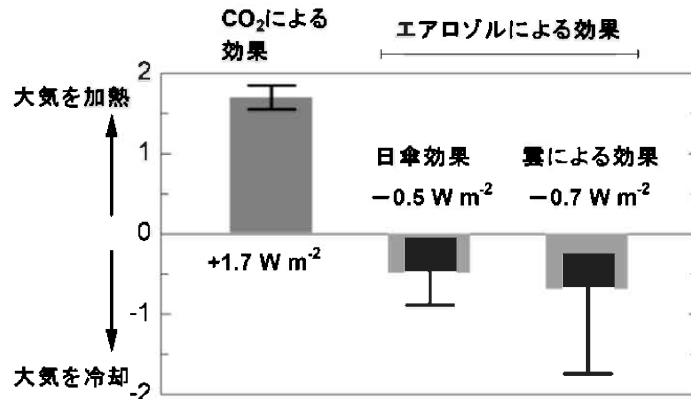


図1: IPCC 第4次報告書<sup>1)</sup>による産業革命前と比較した現在の放射強制力。縦軸の1単位は $1\text{m}^2$ 当たり1W(ワット)の加熱(正の値)もしくは冷却(負の値)を示す。



図2: 視程障害を伴う大気質変動の事例をとらえた写真。京大宇治キャンパス総合研究実験棟5階から南南東の方角を望む。左:2011年10月12日午前9:10、右:2011年10月19日午前8:49。天候はいずれも晴れであったが、10月12日の朝は視程が非常に悪かったことが分かる。

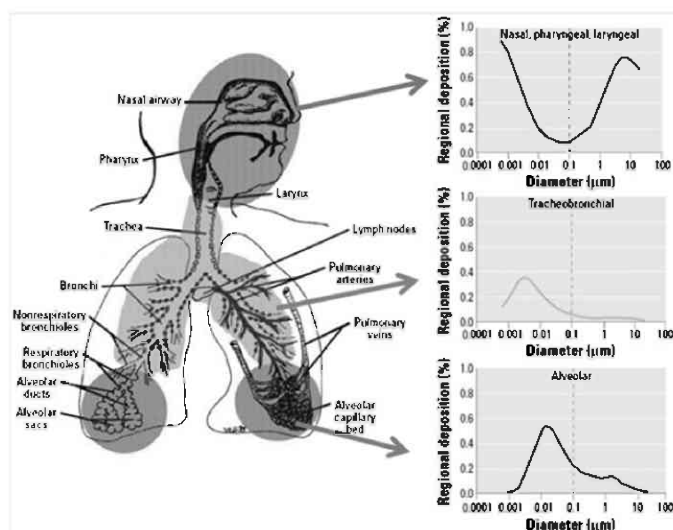


図3：呼吸器系の各部位（胸腔外領域(extrathoracic region)、気管支領域(tracheobronchial region)、肺胞(alveolar region)）におけるエアロゾル粒子の沈降効率<sup>3, 4, 5)</sup>。

される炭化水素の構成比の変化、都市域のヒートアイランド現象などとの関連が指摘されているが、結論は出していない。また、近年欧米諸国においては、微小粒子状物質の健康影響（図3）に関する疫学研究の深化と呼応して、微小粒子の排出規制が強化される動きも見られており、大気環境場における動態の把握は、益々その重要性を増している。こうした背景を踏まえ、本プロジェクトでは、人間生活圏および森林圏に影響を与える大気質変動のより精緻な理解、特に大気微量成分の変質・輸送過程を詳細に調べるために、新しい研究手法の創出を目指している。上述のように、我が国では環境基本法により定められた環境基準があり、大気質監視のためのモニタリングステーションが都市部を中心として全国に配置されている。

しかしながら、大気中へ放出されたガス成分とエアロゾル粒子の拡散は地表付近の気象条件によって強く影響を受けるため、地上の平面的な観測のみならず、接地層を含む上空の大気質観測に興味を持たれる。上空の大気質観測のプラットフォームとして、航空機をチャーターした観測実験がある。しかしながら航空機観測は、航空法に基づく最低安全飛行高度による制約のため、人間生活圏と森林圏を直接取り巻く接地層下部領域を対象にすることが難しい。また、コストの観点からも、頻繁な航空機実験は不可能である。大気微量成分の観測例が少ない地表から高度数十mの領域には、地表面摩擦の影響を大きく受ける接地境界層と呼ばれる大気の層が存在する。接地境界層は、地表付近から放出された物質や熱エネルギーを、上層の大気と交換する際に重要な役割を担う。さらに、水蒸気や気温の時空間変動が大きい接地境界層では、雲凝結核への活性化過程や粒子の変質過程を考える際に重要となるエアロゾル吸湿特性にも大きく寄与していると推察される。そこで本プロジェクトでは、地上モニタリングと、散発的な航空機観測との間を埋める、地表付近の微量成分の空間分布を精細に描写する新しい大気質計測手法を提案する。

2010年秋および2011年春の予備調査ならびに予備観測を踏まえて、2011年には滋賀県甲賀市にある信楽MU観測所（34.9°N, 136.1°E）において、集中観測キャンペーンを実施した。周囲を森林で囲まれた信楽MU観測所は、植生起源物質の一次放出と、滋賀県や大阪方面から輸送される人為起源物質とが相互作用していると期待される興味深いサイトである。また、気象条件を精密に探査することのできるレーダー設備やライダーといった先進的な観測機器が集まっていることから、大気微量物質と気象場の統合的な高時間分解能計測によって、地表付近の大気質の動態把握に繋がる新しい手法が開拓できるものと期待される。本報告では、2010年および2011年の成果の一部を紹介する。

## 2. 研究の結果および考察

### 2.1 2010 年の予備調査の事例解析

初めに、地表面に近い大気における化学過程を直接捉えた事例を示す。図4は、2010年10月28日から11月5日にかけて観測された、エアロゾルの規格化粒径分布の時間変化を示す。粒子数濃度がピークとなる粒径が、ナノ粒子（粒径100 nm以下の粒子）からサブミクロン粒子（同100–1000 nm）へ連続的に成長していく様子（例えば、10月29–30日）や、突発的に粒径100 nmにピークが出現する（例えば10月31日）など、粒径分布が特徴的に変化する興味深い現象が観測された。

ナノ粒子は生成過程の観点から一次粒子と二次粒子に大別できる。前者は、燃焼等に伴い直接粒子の状態で大気中へ排出された粒子であり、後者は、オゾン・窒素酸化物( $\text{NO}_x$ )・硫黄酸化物( $\text{SO}_x$ )・揮発性有機化合物(VOC)などの前駆気体が化学反応により変質した粒子である。とりわけ二次粒子は、その動態把握に未解決の課題が多い。その理由は二つに整理できる。まず一つ目は、現象を捉える難しさである。図4に示したようなナノ粒子からサブミクロン粒子への時間発展的な成長過程（“バナナシェイプ”と称することもある）は、二次粒子の生成を捉えた事例と考えられるが、実際にはこうした観測事例は多くはない。なぜならば、現実の大気中では、共存する一次粒子などの他の起源粒子の影響に埋もれて、二次粒子生成過程のみを抽出することが極めて難しいからである。また、ナノ粒子を高効率で検出することも技術的には容易ではない。例えば、ライダーなどの光学的なセンシング手法はサブミクロン粒子を高感度・高時間分解能で検出できるが、ナノ粒子の場合は光散乱係数が極めて小さくなるため、光学的に検出するには限界がある。

二次粒子の生成過程に未解決の問題が多いもう一つの理由は、そのプロセスの複雑さにあると言えよう。前駆気体からエアロゾル粒子が生成されるまでには、多段階の均一系・不均一系酸化反応を経由することから、その生成過程を理解するには、エアロゾル粒子そのもののみならず、前駆物質の同時観測が必要不可欠となる。一方で、前駆気体もまた、大気中への生成源やその質的・量的変動が複雑である（前章参照）。それゆえ、二次粒子の生成過程を特徴づける時間スケールでの高時間分解能の観測を、多成分の前駆物質に対して行わなければならない。

さて、図4では、バナナシェイプ型の成長過程を経ずに、突発的にサブミクロン粒子のみが増大する現象も観測されている。これは、二次粒子の成長がサブミクロン領域から開始されたとは

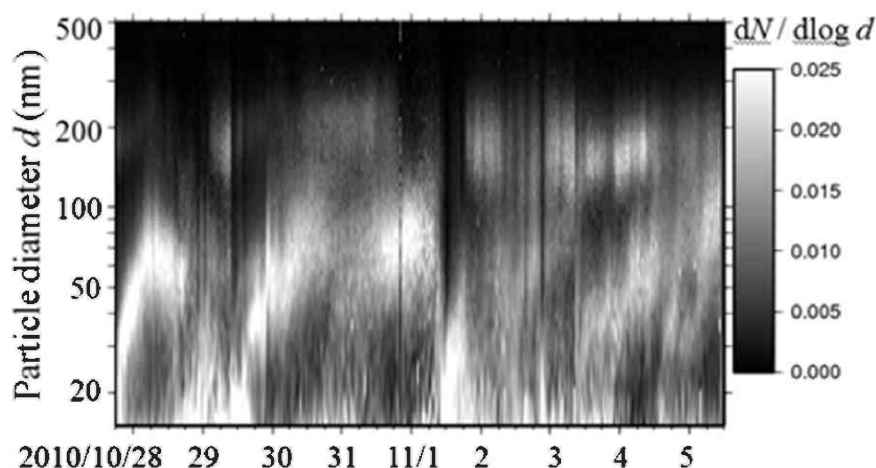


図4：地上で観測された規格化したエアロゾル粒径分布の時間変化（2010/10/28–11/5，信楽（滋賀県））。



解釈し難く、観測サイト以外の場所で二次粒子生成が開始され、気塊の輸送に伴って観測サイトへ粒子が到達したときにはサブミクロン領域にまで成長したためであろうと推測するのがリーズナブルである。そのため、あたかもナノ領域の成長過程を経由せずに二次粒子成長が進行したかのように見えている可能性がある。こうした観測事実からの当然の帰結として、観測された粒径分布の変化は、粒子の生成・変質・成長過程に加え、空気輸送・拡散過程などに依存した特性変動の一部を映し出したものであり、一点のみの観測からでは必ずしも現象の正しい理解には結びつかないと言える。本研究では、観測例の少ない接地境界層付近に注目し、エアロゾル粒子およびその前駆物質となる微量気体成分の空間的立体構造を探索する新しい観測手法を提案する。

## 2.2 接地境界層におけるエアロゾル・微量気体プロファイル観測 (AEROSol and GASes Profiling experiment near surface boundary layer: AEROGAP) の提案

### 2.2.1 キャンペーンの概要

本研究では、人間生活圏と森林圏に直接接している地表面大気の化学特性の精密な計測を指向して、係留気球を用いた新しい観測手法である AEROGAP 実験を提案する。初挑戦となるキャンペーン AEROGAP-Phase I (以下、AEROGAP-I と記載) では、2011 年 8 月 23 日から 9 月 4 日にかけての観測機器の立ち上げ作業と試験運転を経て、2011 年 9 月 5 日から 16 日にかけて集中観測を実施した。図 5 にキャンペーン観測の概要を、表 1 に観測に用いた測定装置の一覧を示す。図 6 には、使用した係留気球の写真を示す。係留気球はロープによって地上に固定され、それ自身が飛行船のような自由飛行はしない。AEROGAP-I で使用した係留気球は、全長 8 m、直径 4 m、内容積 28 m<sup>3</sup> (ヘリウム充填) であり、約 10 kg の浮力を得ることができる。気球本体の下部には、粒径 10 nm の以上の粒子数濃度と粒径 300–5000 nm の粒径分布を計測するエアロゾル観測機器と、気温・湿度の測定器を積み込んだ発泡スチロールを取り付けた (図 6 (B))。計測高度の情報は、小型 GPS 受信機により得た。地上には、ナノサイズからサブミクロンサイズに亘るエアロゾルの粒径分布や、粒子の光散乱・吸収特性、および気柱積算のエアロゾル特性を連続的に観測できる装置を設置した (表 1)。さらに、サブミクロン粒子と水蒸気の高度分布を計測する 3 種類のライダー観測も同期して行われた。これらの地上設置機器のデータと、上空に飛翔させて観測したデータとを突き合わせ、エアロゾルの物理・化学・光学特性の立体分布を導出することを試みた。

一方、エアロゾル生成の前駆物質となる微量気体の計測装置は、装置の重量や電力供給などの事由により、上空へ飛揚させることができない。そこで、地上の観測小屋に多成分同時計測システムを設置し、地上で機器を操作・運用しながらして、化学成分の鉛直立体分布を測定する方法を考案した。それは、係留用ロープの利用である。係留用ロープ自体は軽量で一定の強度があるため、このロープに外径 1/4 インチおよび 3/8 インチの PFA (テトラフルオロエチレン・パーフルオロアルキルビニルエーテル共重合体) チューブを添うように取り付けた。係留気球を、接地境界層を超える高度数百 m 付近まで飛揚させることを想定して、気体成分の外気吸引口は、ロープ経路長 100 m と 50 m の地点に設けた。この二高度の他に、地上を加えた計三高度から連続的にサンプリングした外気を、地上の観測小屋に設置した小型ポンプを用いて取り込み、微量気体成分の分析計へ導入した (図 7)。三高度から吸引された外気を、プログラム制御された電磁弁を用いて数分ごとに流路を自動切り替えしながら分析していくことで、多点の情報を効率的に得られるよう工夫した。測定した気体成分は、オゾン、NO<sub>x</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、VOCs である (表 1)。VOCs は、植生由来物質で二次粒子生成にも関与するイソプレンや、人為起源物質であるトルエンやベンゼンなどを計測した。使用した測定機器の計測原理の説明は、誌面の制約上割愛する。AEROGAP-I キャンペーン中は、高純度窒素、高純度合成空気、各種の混合ガス (NO/N<sub>2</sub>, CO/N<sub>2</sub>, selected VOCs/N<sub>2</sub>) を用いて定期的に装置の較正を行った。また、三高度ごとの PFA チューブの長さの差異が、チューブ内での化学成分の変質に与える影響についても、標準ガス試料を用いて定量的に評価した。

表 1 : 2011 年のキャンペーン観測 AEROGAP- I に用いた観測機器一覧

測定種	測定器	研究機関
O <sub>3</sub>	Thermo Electron 49C, UV absorption spectrometer	RISH
NO <sub>x</sub>	Horiba APNA370, Molybdenum catalysis/Chemiluminescence detector	STEL, Nagoya Univ.
CO	Thermo Electron 48i, Non-dispersive IR spectrometer	RISH
CO <sub>2</sub>	LiCor Biogeoscience Li-840, Non-dispersive IR spectrometer	RISH
Volatile organic compounds	Ionicon PTR-QMS, Proton-Transfer Mass Spectrometry	(Rental)
Aerosol size distribution	( $d = 15\text{-}300\text{ nm}$ ) TSI SMPS, Scanning Mobility Particle Sizer ( $d = 300\text{-}5000\text{ nm}$ ) Rion KM07, Optical Particle Counter Rion KC01D, Optical Particle Counter	STEL, Nagoya Univ. RISH NIPR
Aerosol concentration	( $d > 10\text{ nm}$ ) TSI CPC3007, Condensation Particle Counter	RISH
Aerosol scattering coefficient	Radiance Research M903, Integrating Nephelometer	NIPR
Aerosol absorption coefficient	Radiance Research PSAP, Particle Soot/Absorption Photometer	NIPR
Column aerosol properties	Prede POM02, Skyradiometer	Toyama Univ.
Aerosol profile	Multi-wavelength Mie-Raman Lidar	RISH
Water vapor mixing ratio	Visible-UV Raman Lidar	RISH
Vertical/horizontal wind	Kaijo Co. AR-1000, Doppler SODAR	DPRI
Cloud image	Prede PSV-100, All-sky camera	RISH

\* STEL: Solar-Terrestrial Environment Laboratory

\* NIPR: National Institute of Polar Research

\* DPRI: Disaster Prevention Research Institute

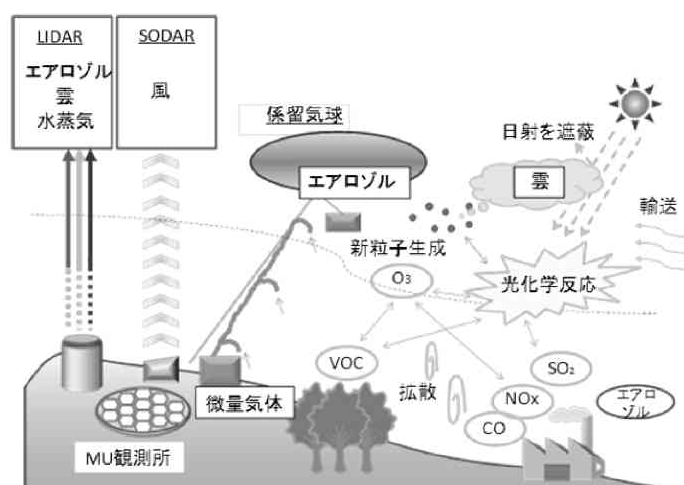


図5： AEROGAP-Iの概要（2011/9/5 - 16，信楽）。

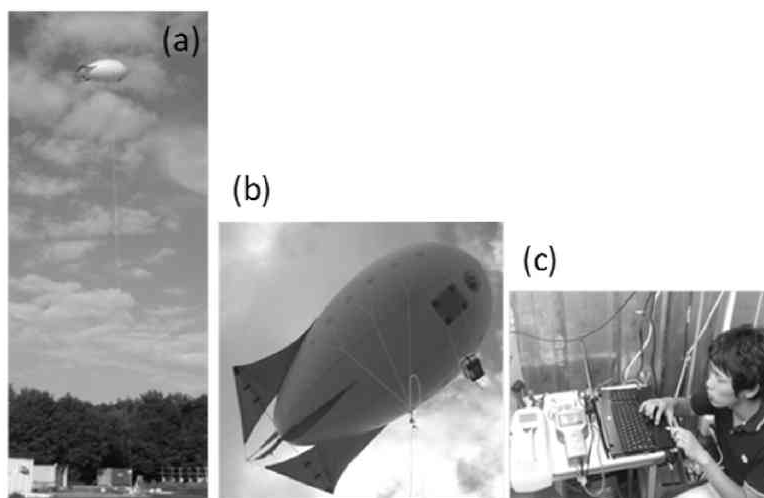


図6： 係留気球を用いた観測の様子。(a)係留気球を飛揚している状態で遠景。(b)係留気球を地上から写した写真。気球の前部にエアロゾル計測機器を収納した箱がぶら下がっている。(c)地上設置コンテナ内においてデータのバックアップ作業を行っている。

なお、エアロゾル粒子や微量気体成分の観測と同期して、音波を利用して上空の風を計測する SODAR (SO<sub>N</sub>ic Detection And Ranging) も使用した (表1)。これにより、気球に吊り下げた気温湿度の情報と併せることで、接地境界層の微気象特性が分かる。

## 2.2.2 AEROGAP-I キャンペーンの初期解析結果

ここでは、AEROGAP-I キャンペーンの初期解析結果の一例として、図8に、9月14日に観測された (a) 鉛直風と、(b) 地上、高度 50 m、100 m のオゾン濃度、および (c) 地上および高度約 100 m における粒径 10–15 nm 以上の粒子数濃度の時間変化を示す。オゾン、太阳光の存在下で NO<sub>x</sub> の光化学反応により生成される。したがって、図8 (b) に示したように、日中の極大と夜間の極小を与えるような変動特性を有する。一方で、信楽 MU 観測所は、人口密集地に立地していないにも関わらず、日中の極大濃度が 60ppb (0.06 ppm) に達しており、環境基準を超過する寸前のレベルに達している。こう



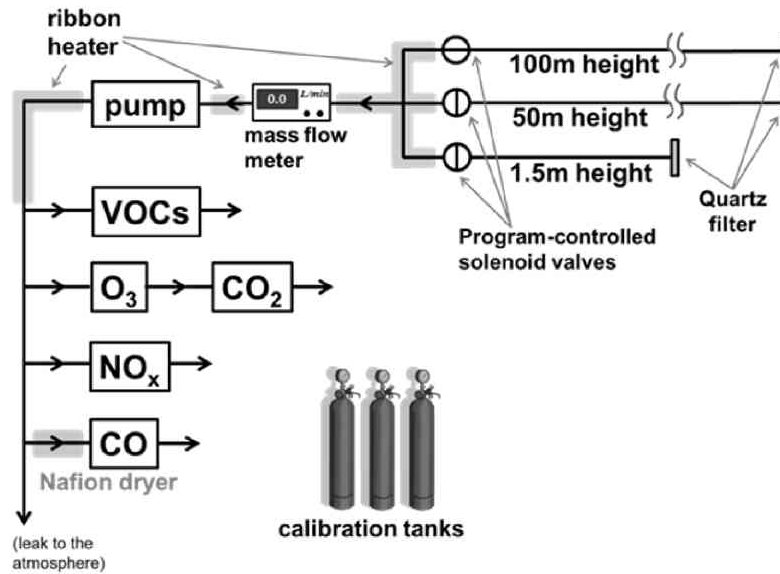


図7： 今回開発した微量気体計測システムの地上設置部分のダイアグラム。

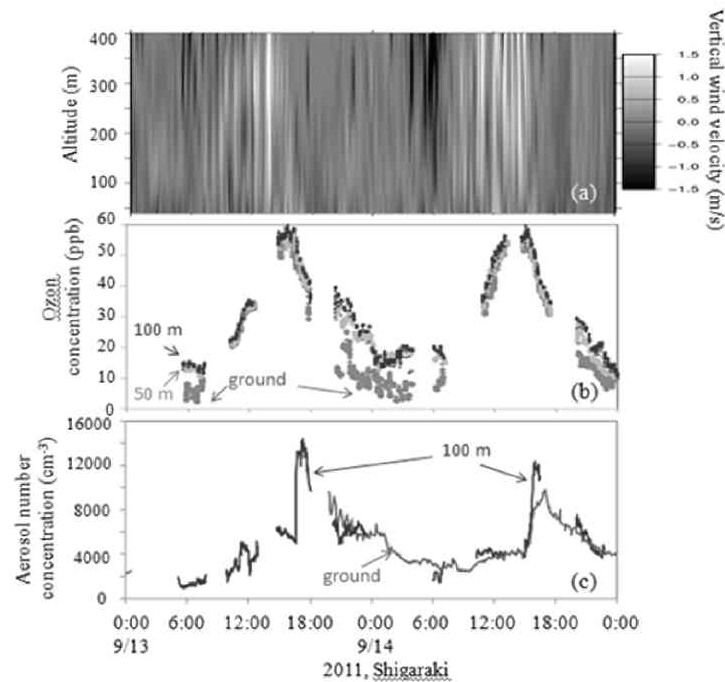


図8： (a) 高度50–400 mまでの鉛直風、(b) 地上、高度50 m、100 mのオゾン濃度および(c) 地上と高度100 mにおける粒径10–15 nm以上の粒子数濃度の時間変化(2011年9月13–14日、信楽)。

した大気汚染イベントは、観測サイトを含むより広域的な空間スケールでの化学反応と輸送現象が関与していることを伺わせる。また、日中ほど三高度毎のオゾン濃度の差異が小さく(つまり濃度勾配が緩い)、深夜から夜明け前にかけて濃度の違いが大きくなる(つまり濃度勾配が急である)様子が捉えられている。この背景として、昼間は地表面大気の乱流混合が活発であるのに対し、夜間には接地

逆転層が形成され、効率的な乾性沈着が進行している可能性が示唆される。オゾン、それ自身が人体や植生に対する毒性を有しているだけでなく、植生由来あるいは人為起源の VOC を酸化し、二次粒子生成にも深く関与していることが知られており、現在さらに詳細なデータ解析を進めている。また、日中に強い対流が観測された鉛直風は、15 時をすぎると急速に風速が弱くなる傾向がみられた。その変化と呼応するように、ナノ粒子の数濃度が増加する興味深い現象を捉えている。さらに注目すべき点は、地表と高度約 100 m の粒子数濃度に違いがみられたことである。これは、ナノ粒子の増加率に高度依存性がある可能性を示唆するものであり、係留気球をプラットフォームとした観測が、地上観測のみでは抽出し難い情報を引き出せることを示す好例の一つであろう。

### 3. 今後の展開

AEROGAP-I キャンペーンでは、試行錯誤を繰り返しながらのシステム構築を行ったこともあり、観測機器の不具合等も含めて、体力的にも非常に負担のかかるキャンペーンであった。同時に、様々な問題点も浮き彫りにできたことは、今後の計画や改善策を練るうえで良かったと考えている。問題点の一つとして、係留気球の限界も分かってきた。理想的にはより高い高度(～300 m)への係留気球の飛翔が可能になれば、航空機による観測がアクセスできる最低高度付近までを探索できるのだが、PFA チューブの自重のため、実質的な浮力には上限があり、ロープ長 100 m 程度が限界であることが分かった。事実、係留気球に吊り下げた GPS (図 6 (b)) の解析から、風の場合次第では、気球が 10 メートル近くも急激に下降してしまう事例もあった。より高い高度へアクセスし、なおかつ、その高度で安定的に観測を行うための技術的改善策は、今後の課題の一つである。

2011 年は晩夏に観測期間を設けたが、2012 年度は、森林圏からの植物由来成分がより豊富に放出される盛夏に、本研究で提案した係留気球観測システムを用いて、信楽 MU 観測所でキャンペーンを実施することを計画している。一方、観測サイトの空間的な展開として、植生を含めて信楽サイトとは地上環境が異なる地域に観測対象を広げ、様々な条件下における大気観測データを蓄積することも考えている。2011 年 11 月上旬には、京都府美山町にある京都大学・芦生演習林に見学に向う機会を得ることができた。現地へのアクセシビリティや機器設置のためのスペース・電力について、京大フィールド科学研究センターと情報交換を行っている。また、人間生活圏を直接取り巻く大気質を理解するうえで欠かせない都市域にも観測サイトを設けることができるかどうかを検討している。図 2 に紹介したように、都市域の大気汚染イベントは、人間生活に直接影響する現象である。係留気球による観測が難しい市街地での観測では、アイセーフレーザを用いた紫外ライダーシステムなどが活用できると考えられる。例えば、本報告書では触れないが、サブミクロン粒子よりもさらに大きなミクロン粒子である黄砂現象の動態解明には、ライダー観測が重要なアプローチの一つであることが分かっている。その理由は、気象庁の発表する黄砂現象が目視をベースにしているのに対して、目視では捉えられない“希薄な”黄砂イベントも光学観測ならば検出ができるからである。見た目に視程障害を伴わないような希薄な黄砂イベントも、人への健康影響が疑われる指摘があり<sup>6)</sup>、最新の観測技術の有効な活用は、新しい知見の獲得に繋がる。以上のように、必ずしも係留気球を使った観測のみに固執するわけではなく、捉えたい現象の特性を予め十分に精査し、人間生活圏・森林圏の様々な環境条件下におけるガス状・粒子状の汚染物質の動態把握につながる手法の開拓を進めていきたいと考えている。

### 4. 謝辞

観測の実施にあたりご配慮を賜りました京都大学・生存圏研究所の橋口浩之先生と古本淳一先生に感謝申し上げます。エアロゾル計測機器の一部は、国立極地研究所・塩原匡貴先生より拝借致しました。エアロゾル計測は、京都大学・生存圏研究所の宮脇力さん、松田真さんにご助力頂きました。さ

らに、アルバイト募集広告を見つけて観測補助作業に参加して下さった、京大の堀田耕平さん（修士1回生（学生は当時。以下同じ））、田中裕規さん（学部3回生）、坪井彩さん（修士1回生）、曳地京さん（学部1回生）にもお礼申し上げます。係留気球の飛揚作業は、株式会社銀星アド様のご協力を得ました。

## 参考文献

- 1) IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor M., and Miller, H.L., eds., p. 996, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- 2) Seinfeld, J. H., and S. N. Pandis, Atmospheric chemistry and physics, Wiley Interscience, New York, 1998.
- 3) U.S. EPA. Air Quality Criteria for Particulate Matter, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA 600/P-99/002aF-bF, 2004.
- 4) Task Group on Lung Dynamics, Health Physics., 12, 173-223, 1996.
- 5) International Commission on Radiological Protection: Human respiratory tract model for radiological protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP, Vol. 24, Nos 1-3. Elsevier Science Ltd, Oxford, 1994.
- 6) Kanatani K. T., I. Ito, W. K. Al-Delaimy, Y. Adachi, W. C. Mathews, J. W. Ramsdell, Toyama Asian Desert Dust and Asthma Study Team: Desert Dust Exposure Is Associated with Increased Risk of Asthma Hospitalization in Children, Am. J. Respir. Crit. Care Med., Vol 182. pp 1475-1481, 2010.